

## СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В АЭРОЗОЛЯХ ВОЗДУХА (PM-10, PM-2.5) МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

А. Е. Темиржанова<sup>1</sup>, Е. Г. Язиков<sup>2</sup>, М. Т. Дюсембаева<sup>1</sup>, Е. З. Шакенов<sup>1</sup>,  
Г. М. Есильканов<sup>1</sup>, Н. Ж. Мухамедияров<sup>1</sup>, А. Ж. Ташекова<sup>1</sup>, В. В. Колбин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт радиационной безопасности и экологии  
Курчатов, Казахстан, [temirzhanova.aray@mail.ru](mailto:temirzhanova.aray@mail.ru)

<sup>2</sup>Томский политехнический университет  
Томск, Россия, [yazikov@tpu.ru](mailto:yazikov@tpu.ru)

## SEASONAL DYNAMICS OF HEAVY METALS AND NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDES IN AIR AEROSOLS (PM-10, PM-2.5) OF SMALL SETTLEMENTS

A. Ye. Temirzhanova<sup>1</sup>, Ye. G. Yazikov<sup>2</sup>, M. T. Dyusembayeva<sup>1</sup>, Ye. Z. Shakenov<sup>1</sup>,  
G. M. Yesilkanov<sup>1</sup>, N. Zh. Mukhamediyarov<sup>1</sup>, A. Zh. Tasheкова<sup>1</sup>, V. V. Kolbin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radiation Safety and Ecology  
Kurchatov, Kazakhstan, [temirzhanova.aray@mail.ru](mailto:temirzhanova.aray@mail.ru)

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russia, [yazikov@tpu.ru](mailto:yazikov@tpu.ru)

As of today, the chemical composition of natural components of Semipalatinsk Test Site (STS) and adjacent areas are poorly studied. The chemical composition of air aerosol particulate matter (PM-2.5, PM-10) is of special interest as it contains all kinds of heavy metals, toxic elements, and radionuclides [1, 2, 3]. Suspended substances of less than 10 micron travel to a long distance and are potential contaminants of the major natural components. For which reason, a matter of research arises to reveal spatial distribution of the content of chemical elements and radionuclides on STS and in the adjacent area by studying air aerosol particulate matter.

### Введение

Впервые проведено исследование по определению массовых концентраций и элементного составов твердых частиц аэрозолей воздуха, размерами 10 и 2,5 мкм (PM-10, PM-2.5) в атмосфере малых населенных пунктов, на примере с. Долонь. Данный населенный пункт находится в непосредственной близости (40 км) от границ Семипалатинского испытательного полигона (СИП), в районе прохождения одного из радиоактивных следов выпадения, т. е. по Восточному следу. Отбор проб был проведен в отопительный и неотопительный сезоны для оценки различий между летними и зимними концентрациями химических компонентов и естественных радионуклидов атмосферного воздуха прилегающих зон СИП в северо-восточном направлении. Исследуемые твердые частицы представляют собой сложную смесь, содержащую тяжелые металлы, радионуклиды и множество других химических компонентов, в зависимости от их источников образования [4, 5, 6]. Изучение переноса, химического и радионуклидного составов, а также сезонной динамики таких малых атмосферных частиц позволил выявить основные источники их формирования и дальность их пространственного распределения.

### Материалы и методы

**Твердые частицы аэрозолей воздуха.** Среднесуточные пробы твердых частиц аэрозолей воздуха отбирали переносным пробоотборником воздуха CF-993B с фиксированной скоростью на стационарном посту мониторинга. Стационарный пост был расположен на ровном участке ландшафта вдали от строений, леса и других препятствий на высоте 1,5 м от поверхности земли с твердым непылящим покрытием.

Подготовку фильтров с пробами твердых частиц аэрозолей воздуха для элементного анализа проводили способом автоклавного разложения, с использованием концентрированных фтористоводородной (HF) и азотной (HNO<sub>3</sub>) кислот в соотношении 1 : 2. Автоклавы выдерживали в сушильном шкафу в течение 4 ч., нагретый до температуры 160 °С, приливали 7 М азотную кислоту и выпаривали раствор до образования сухих солей при температуре +160 °С. После охлаждения объем раствора доводили до 15 мл 7 М HNO<sub>3</sub>.

В каждой партии фильтров для отбора твердых частиц аэрозолей воздуха анализировали содержание химических элементов в чистых неэкспонированных фильтрах.

Определение содержания естественных радионуклидов, тяжелых металлов, редкоземельных элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700x «Agilent Technologies», а также атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) iCAP 6000 Duo «Thermo Scientific». Спектрометры были откалиброваны с помощью сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов, производства США, компании «Perkin Elmer». Относительное стандартное отклонение (RSD) измерений было меньше 10 %.

### Результаты и их обсуждение

Сезонные колебания концентрации твердых частиц, размером 10 мкм исследуемого региона имеют четко выраженный характер, более высокие содержания этих частиц зафиксированы в неотапительный период 70 мкг/м<sup>3</sup>, в отапительный – около 40 мкг/м<sup>3</sup>. Более мелкие частицы аэрозолей воздуха размером 2,5 мкм преимущественно антропогенного происхождения распределились иначе, в зимний сезон их концентрация больше в 2,5 раза в сравнении с летним содержанием, 25 мкг/м<sup>3</sup> на 10 мкг/м<sup>3</sup> соответственно.

Также в данной работе исследована связь между концентрацией твердых частиц и метеорологическими переменными, такими как направление и скорость ветра, температура и влажность. Так, например между содержанием РМи увеличением относительной влажности установлена положительная корреляция (коэффициент корреляции равен 0,5), тогда как между температурой окружающей среды и массой РМ – отрицательная (коэффициент корреляции равен – 0,7), что говорит об их взаимозависимости.

Были исследованы среднемесячные концентрации исследуемых химических элементов и естественных радионуклидов в твердых частицах аэрозолей воздуха. Выявлена группа элементов со стабильной динамикой распределения концентрации по сезонам за исследуемый период. Элементы этой группы – Cu, Ni, Co (таблица 1).

Определена схожая картина распределения среднесуточных концентраций меди и никеля по некоторым месяцам отопительного и неотапительного сезонов. Разница между средними значениями концентрации за отопительный и неотапительный сезоны по никелю составляет 1,3 раза, по меди – 1,4 раза. Стабильность динамики распределения содержания кобальта наблюдается практически по всем месяцам, за исключением месяцев март и декабрь. Такого рода динамика распределения содержания данных элементов независимо от периодов свидетельствует

**Таблица 1.** Среднемесячная концентрация и пределы колебаний химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха (n = 51)

Месяцы	Элементы, нг/м <sup>3</sup>		
	Co	Ni	Cu
Март, n = 9	$\frac{0,20}{0,03-1,5}$	$\frac{3,8}{0,10-7,7}$	$\frac{170}{100-470}$
Апрель, n = 7	$\frac{0,03}{0,03-1,3}$	$\frac{0,8}{0,1-7,8}$	$\frac{86}{21-140}$
Июнь, n = 5	$\frac{0,03}{0,03-0,03}$	$\frac{0,10}{0,10-0,10}$	$\frac{80}{80-80}$
Июль, n = 6	$\frac{0,03}{0,03-0,03}$	$\frac{6,7}{4,2-7,7}$	$\frac{190}{120-250}$
Август, n = 6	$\frac{0,03}{0,03-0,03}$	$\frac{7,5}{5-14}$	$\frac{260}{150-380}$
Сентябрь, n = 4	$\frac{0,03}{0,03-0,03}$	$\frac{4,6}{0,20-7,6}$	$\frac{160}{150-340}$
Октябрь, n = 6	$\frac{0,07}{0,03-4,3}$	$\frac{13}{12-31}$	$\frac{290}{150-520}$
Декабрь, n = 8	$\frac{0,9}{0,03-5}$	$\frac{0,10}{0,10-50}$	$\frac{260}{19-580}$
ПДК <sub>с.с.</sub> /ОБУВ	1000	1000	2000

в числителе – значение медианы, в знаменателе – минимальное и максимальное значение концентраций элементов; ПДК<sub>с.с.</sub> – средние суточные предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [7]; ОБУВ – ориентировочные безопасные уровни воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [8]; пределы обнаружения элементов даны в мкг/л.

об их разных источниках поступления в атмосферный воздух исследуемой территории. Возможно, наличие концентрации меди и никеля в отопительный период связано с интенсивным процессом сжигания твердого топлива, поскольку в пробах золы были обнаружены повышенные концентрации этих элементов.

Среднее содержание естественного радионуклида  $^{238}\text{U}$  в исследуемых образцах твердых частиц аэрозолей воздуха составило за отопительный период  $1,8 \cdot 10^{-5}$  Бк/м<sup>3</sup>, за неотопительный –  $8,4 \cdot 10^{-6}$  Бк/м<sup>3</sup>. Также за неотопительный период эпизодически были уловлены концентрации  $^{235}\text{U}$ . Так, в марте, апреле и начале октября средняя объемная активность данного изотопа составила  $4,5 \cdot 10^{-7}$  Бк/м<sup>3</sup>. Однако, следует отметить, что соотношение изотопов урана имеет природный характер. Значимые данные были получены и по содержанию  $^{232}\text{Th}$  (таблица 2).

Максимальный пик возрастания уровня содержания исследуемого радионуклида приходится на июнь месяц, где объемная активность равна  $2,0 \cdot 10^{-5}$  Бк/м<sup>3</sup>. Данная динамика распределения содержания естественных радионуклидов свидетельствует о почвенно-эрозионном вкладе. Анализ полученных данных показал, что в пробах воздушных аэрозолей превышения предельно допустимой концентрации среднесуточного содержания естественного радионуклида (Th) и других исследуемых химических элементов не выявлено. Следует отметить, что такие нормируемые компоненты, как Be, Zn, Cd в твердых частицах аэрозолей воздуха не были обнаружены.

### Заключение

В результате была получена информация об уровне загрязнения воздуха твердыми частицами в данной провинции, а также об их источнике путем определения концентраций некоторых микроэле-

**Таблица 2.** Объемная активность и пределы колебаний  $^{232}\text{Th}$  в твердых частицах аэрозолей воздуха (n = 51)

Месяцы	$^{232}\text{Th}$ , Бк/м <sup>3</sup>
Март, n = 9	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7} - 2,0 \cdot 10^{-7}}$
Апрель, n = 7	$\frac{5,7 \cdot 10^{-6}}{2,0 \cdot 10^{-7} - 9,3 \cdot 10^{-6}}$
Июнь, n = 5	$\frac{2,0 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-5} - 5,7 \cdot 10^{-5}}$
Июль, n = 6	$\frac{4,1 \cdot 10^{-6}}{8,1 \cdot 10^{-7} - 7,3 \cdot 10^{-6}}$
Август, n = 6	$\frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-7} - 1,7 \cdot 10^{-5}}$
Сентябрь, n = 4	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7} - 2,0 \cdot 10^{-7}}$
Октябрь, n = 6	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7} - 2,0 \cdot 10^{-7}}$
Декабрь, n = 8	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7} - 2,0 \cdot 10^{-7}}$

ментов и естественных радионуклидов. Одними из источников формирования химического и радионуклидного составов исследуемых частиц аэрозолей прилегающих зон к СИПна данный момент являются преимущественно почвенно-эрозионный процесс, а также сжигание твердого топлива. Однако, для оценки вклада СИП в качественный состав воздуха прилегающих зон необходимы дополнительные исследования по изучению химического и радионуклидного составов РМ-10 и РМ-2.5 непосредственно отобранных с основных площадок СИП и по господствующему направлению ветра.

### Литература

- Byeon S. H. Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM(2.5-1.0)) and coarse (PM(10-2.5)) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM) / S. H. Byeon, R. Willis, T. M. Peters // Int J Environ Res Public Health, 2015. – № 12 (2). – P. 2090–2104. doi:10.3390/ijerph120202090.
- Zeb B. On the Morphology and Composition of Particulate Matter in an Urban Environment. / B. Zeb, K. Alam, A. Sorooshian, T. Blaschke, I. Ahmad, I. Shahid // Aerosol Air Qual Res., 2018. – 18 (6). – P. 1431–1447. doi:10.4209/aaqr.2017.09.0340.
- Remoundaki E. PM10 composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). / E. Remoundaki; A. Bourliva; P. Kokkalis, R. E. Mamouri; A. Papayannis; T. Grigoratos; C. Samara; M. Tsezos // Sci Total Environ., 2011. – 409 (20). – P. 4361–4372. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.06.026.
- Minguillón M. C. Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: local or regional pollution? / M. C. Minguillón, X. Querol, U. Baltensperger, A. S. Prévôt // Sci Total Environ. 2012; 427-428:191-202. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.04.030.
- Hsu C. Y. Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2.5 in the western coastal area of central Taiwan. / C. Y. Hsu, H. C. Chiang, S. L. Lin, M. J. Chen, T. Y. Lin, Y. C. Chen // Sci Total Environ., 2016. – № 541. – P. 1139–1150. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.122.
- Bozkurt Z. Mass concentrations and elemental compositions of PM10 in Duzce, Turkey. / Z. Bozkurt, F. Taspinar, B. Pekey, H. Pekey, O. O. Uzmez,

- T. Dogeroglu, O. E. Gaga // Athens Journal of Sciences, 2017. – № 4 (2). – P. 87–100. <https://doi.org/10.30958/ajs.4-2-1>.
7. Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, утверждены приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан от 28 февраля 2015 года № 168. <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/links>.
8. ГН 2.1.6.3492-17 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений от 22 декабря 2017 года N 165. <http://docs.cntd.ru/document/556185926>.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ УРАН-238, ТОРИЙ-232 И РАДИЙ-226 В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ ПРИ СУХОМ ОСАЖДЕНИИ АЭРОЗОЛЕЙ

М. П. Тентюков

*Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина  
Сыктывкар, Россия, [tentukov@ib.komisc.ru](mailto:tentukov@ib.komisc.ru)*

## CHARACTERISTICS OF NATURAL RADIONUCLIDES DISTRIBUTION SUCH AS URANIUM-238, THORIUM-232 AND RADIUM 226 IN SURFACE AIR DURING DRY DEPOSITION OF AEROSOLS

M. P. Tentyukov

*Pitirim Sorokin Syktyvkar State University  
Syktyvkar, Russia, [tentukov@ib.komisc.ru](mailto:tentukov@ib.komisc.ru)*

A new method for studying the radioactive aerosols distribution in the surface air using the passive aerosol collection method is proposed. A description of the method and device for passive aerosol collection is given. The method application results are presented.

### Введение

Известно, что носителями радиоактивности в атмосфере являются аэрозольные частицы в интервале радиусов от 0,015 до 0,5 мкм [1]. Между тем, в настоящее время содержание аэрозольных веществ в атмосфере постоянно растет [2], что во многом обусловлено усилением загрязнения воздушной среды за счет эмиссии пылевых частиц с земной поверхности, объем которых за последние сто лет в тропосфере возрос почти в два раза [3]. При этом ежегодная доля поступления земной пыли в газовую оболочку планеты составляет до 1,600 млрд. т [4], из которых 75 % оседает на сушу, а 25 % – в океан. Земная пыль в атмосфере способствует расширению спектра размеров аэрозольных частиц, участвующих в воздушном переносе радиоактивности. Предполагается, что определенную роль в этом процессе играют аэрозольные частицы диаметром 0,1–10,0 мкм. Они составляют более 70 % объема концентрации всех взвешенных в атмосфере частиц и примерно половину суммарной поверхности аэрозолей [5]. Их доля в общем объеме выпадающих осадков для умеренных широт равна 10÷20 %, и при сухом осаждении аэрозольные частицы содержат загрязняющих веществ

на 25 % больше, чем дождевые осадки [6]. В этой связи изучение особенностей распределения радионуклидов в приземном воздухе при сухом осаждении аэрозолей весьма актуально.

### Методика

**К обоснованию способа пассивного пробоотбора аэрозолей.** Существует активный способ сбора аэрозолей, включающий осаждение на многослойные фильтры путем прокачки потока воздуха (аспирацией) сквозь фильтры с использованием специальных вентиляционных установок (аспираторов) [7]. Между тем, количественные характеристики, полученные таким способом, нельзя рассматривать как приходные части баланса вещества в экосистеме. Они отображают потенциальные запасы аэрозольного вещества в приземном воздухе, которые не всегда и не полностью поступают на подстилающую поверхность [8]. Способ пассивного пробоотбора аэрозолей более полно воспроизводит природные процессы осаждения аэрозолей. Его механизм основан на молекулярной диффузии частицы из анализируемого объекта к сорбенту. Последний представляет собой определенным образом подготовленную подложку с